

## Szakmai összefoglaló a T047002 sz. kutatási projekt eredményeiről

### Kutatási célok és eredmények:

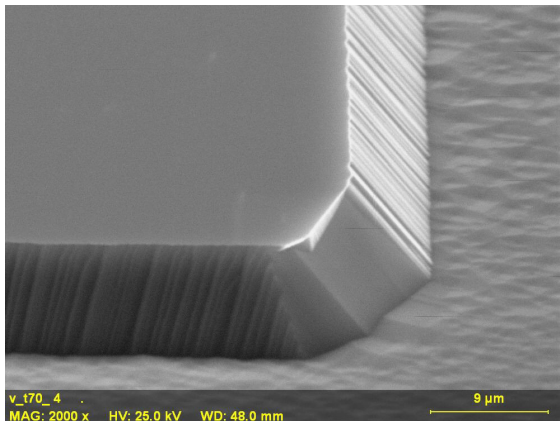
A tervezett kutatási program célja elsősorban új, tömbi mikromechanikai megmunkálási eljárások (bulk micromachining) kidolgozása volt, amelyekkel a kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkező egykristályos szilíciumból a felületi mikromechanikai eljárásokra (surface micromachining) jellemző méretű és geometriájú alkatrészek állíthatók elő. Ez utóbbi technikára jellemző, hogy a mechanikai, deformálódó elem a hordozó felületén, amorf vagy polikristályos, leválasztott vékonyrétegből készül, vastagsága és a hordozótól való réstávolsága maximum néhány  $\mu\text{m}$ , míg laterális méretei a 10-100  $\mu\text{m}$  tartományba esnek. Az eljárás előnye, hogy viszonylag könnyen illeszthető a klasszikus CMOS IC gyártástechnológiába, így lehetőséget nyújt monolit formában integrált érzékelők előállítására. Ugyanakkor a vékonyrétegek rosszabb mechanikai tulajdonságai miatt az egykristályos Si érzékelővel a nyomás-, erő- és gyorsulásmérőkben, egykarú emelő szerkezetekben sokkal jobb paraméterű eszközök állíthatók elő, így a CMOS integrált tömbi Si megmunkálások kidolgozása új, jobb eszközök megjelenését eredményezi.

A fenti munkával párhuzamosan a tömbi Si megmunkálás új módszereinek kidolgozásával új geometriájú Si struktúrák előállítását tűztük ki.

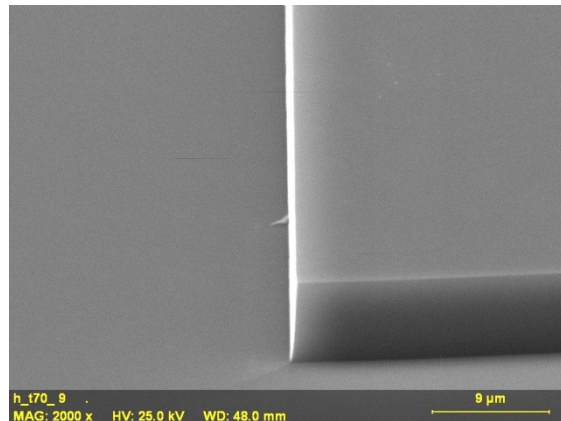
A munka során törekedtünk arra, hogy a kutatási-kísérleti eredmények birtokában, a szakmai-technológiai háttér megalapozásával olyan technikákat dolgozzunk ki, melyekkel a gyakorlatban, új, ill. jobb tulajdonságú mikro-elektromechanikai rendszerek (MEMS) állíthatók elő. Ennek bizonyítására demonstrációs szerkezeteket, ill. eszközöket készítettünk.

### Az eredmények ismertetése:

- Vizsgáltuk az anizotróp lúgos Si marás marási mechanizmusát erős oxidálószer jelenlétében és** a kísérleti eredmények alapján kidolgoztunk egy olyan – egyszerű és olcsó – technológiát, amivel az egykristályos Si-ban merőleges falú, zárt alkatrészek állíthatók elő. Összehasonlítva a klasszikus lúgos marással megállapítottuk, hogy a NaOCl (hypo) hozzáadása a vizes NaOH marószerhez jelentős mértékben csökkenti az {100} és {110} síkok és valamelyest növeli az {111} sík marási sebességét. A három meghatározó, legkisebb Miller-indexű síkon a bruttó kémiai reakció (oxidáció-redukció-oldódás) aktiválási energiája közötti különbség minimális (0.51 eV, 0.52 eV ill. 0.51 eV az {111}, {100} és az {110} síkokra), ami jelzi, hogy a különböző síkokon az oxidációs centrumok száma (atomi lépcsők) közel azonos. A marási sebességek változásának oka kettős: egyrészt az {111} síkon az oxidálószer jelenlétének köszönhetően megnövekedett sebességű oxidációs lépés, másrészt az {100} and {110} síkok erősebb passziválódása, ami összességében az anizotropia jelentős csökkenéséhez vezet (a marási sebesség aránya a  $\langle 110 \rangle / \langle 111 \rangle$  síkokon a 80-100-ról 4-5-re csökken). A gyakorlatban a mart felületek minősége a polírozott felületekéhez hasonló, a hibahelyek nem hívódnak elő. Összehasonlítva az  $\langle 110 \rangle$  és az  $\langle 100 \rangle$  irányban mutatott marási sebességeket, megállapítottuk, hogy az oxidálószer jelenlétében az  $r_{\langle 100 \rangle} < r_{\langle 110 \rangle}$  érvényes, ami lehetővé teszi, hogy (100) Si szeleteken  $\langle 100 \rangle$  irányban orientált maszkoló téglalapokkal merőleges falú oszlopokat alakítsunk ki. Ezt a lehetőséget használtuk ki egy 3D mikroerőmérő szerkezet előállításában, ahol a nyomásmérő membrán síkjából kiemelkedő, a támadó erő nyíró komponenseit megerősítő Si hasábot formáltunk.



a.



b.

(100) Si kristályban mart alakzat négyzetes maszkolással. 20%-os NaOH-ban (a), 20%-os NaOH és telített NaOCl 3:1 arányú keverékében(b).

- **A Si elektrokémiai marásával kialakítható pórusos Si segédretegekkel többféle demonstrációs szerkezetet hoztunk létre.**

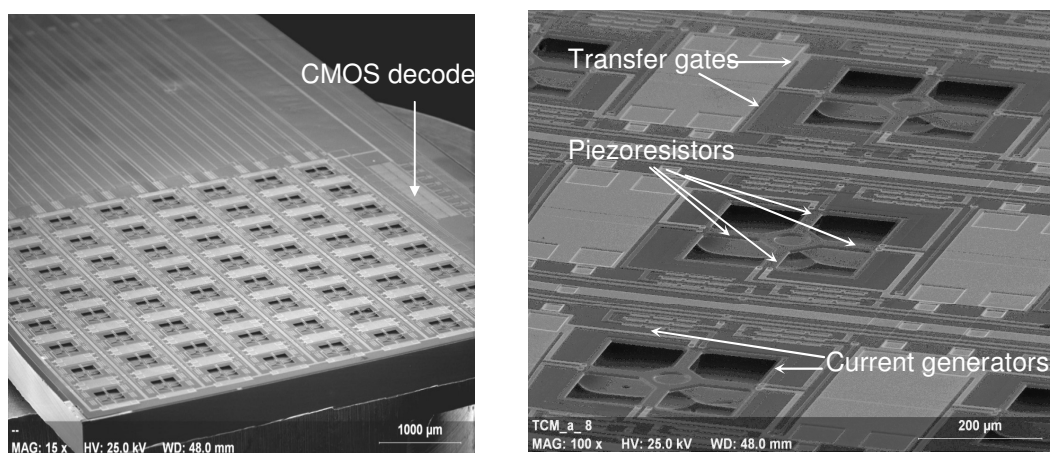
- Az ANSYS végelem program segítségével előállítottuk a **pórusos Si elektrokémiai marásának egyszerűsített 3D-s marási modelljét**, mely jó *kvalitatív* eredményeket ad. A 3D-s modellel értelemszerűen bonyolult 3D-s szerkezetek modellezhetőek bármiféle szimmetria feltevése nélkül, azonban ennek az ára a nagy elem és csomópont szám, ami egyrészt az ANSYS korlátozhat (licenstől függően) és a megoldás rendkívül idő és számítógép erőforrás igényes. A modellezéshez az ANSYS SOLID69 3-D kapcsolt termo-elektromos elemét használjuk. A modellezés alapja és folyamata megegyezik a 2D-s modellével, a feszültségkülönbség hatására kialakuló áramsűrűséget számítjuk ki majd a maródáshoz szükséges feltételek teljesülése esetén az egyes szilícium elemek anyag paramétereit „oldat” paraméterre változtatjuk és a megváltoztatott modellt újrafuttatjuk. Így megfelelő számú lépés után megkapható a végső marási front profilja. A számított és a valós minta marási profiljának összehasonlítása alapján a modell finomítása szükséges, azaz a modellben használt ellenállás értékek „finomhangolását” kell majd elvégezni. A modellből hiányzik a folyadék és a szilárd szubsztrát határán létrejövő határ réteg figyelembe vétele. Mivel a határréteget rendkívül nehéz és körülményes lenne definiálni (már csak a végelem háló miatt is), ezért ezt valamilyen módosított ellenállás paraméterrel tartjuk elképzelhetőnek.

Jelen állapotában a modell még nem alkalmas nagy bonyolultságú 3D szerkezetek tervezésére, de Vízváry Zsolt külföldi ösztöndíja miatt ezt a munkát csak a későbbiekben tudjuk folytatni, ill. befejezni.

- **Pórusos Si mikromechanikai eljárás integrálása CMOS technológiai műveletsorba.**

2000-2003-ban az NKTH TeleSense projekt keretében, 2004-től a jelen projekt támogatásával kifejlesztettünk egy olyan pórusos Si mikromechanikai eljárást mellyel integrálható 3D

mikroerőmérő szerkezet állítható elő. A technológia továbbfejlesztésével kidolgoztunk egy olyan – 13 maszkos és közel 120 lépésből álló - technológiai műveletsort, amellyel a pórusos Si mikromegmunkálás illeszthető a hagyományos CMOS technológiába. Az új eljárással 64 elemű integrált mikroerőmérő chip-et készítettünk, amely az érzékelők mellett CMOS dekóder áramkört is tartalmaz. A CMOS technológiába integrált mikromechanikai eljárás és a mikroerőmérő chip nemzetközi szabadalmi bejelentés alatt áll (WO 2007/144677 A3, a P0600488 magyar bejelentés (2006. jún. 14) alapján). Ezen felül egy konferencia kiadványban és két folyóiratcikkben ismertettük az eredményeinket. A nemzetközi szabadalmi igény beadása mellett kiemelkedő eredménynek tartom, hogy a CMOS kompatibilis technológia kidolgozásával és az alternatív mikroerőmérő chipek előállításával lehetővé vált, hogy a befogadó intézmény (MFA) tapintásérzékelők fejlesztésére és gyártására társtulajdonosként egy spin-off céget alapítson (TactoLogic Kft, [www.tactologic.com](http://www.tactologic.com)).

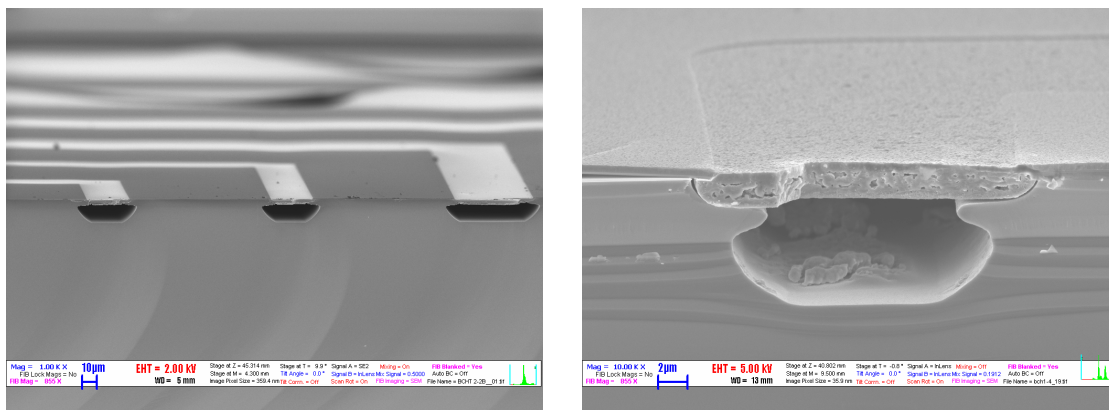


*64 db 3D mikroerőmérőt és CMOS dekódert tartalmazó tapintásérzékelő chip pásztázó elektronmikroszkópos képei*

- **Membránok és eltemetett mikrocatornák készítése pórusos Si kettősrétegből**

W. Ambruster munkájának alapján elektrokémiai marással létrehozhatók zárt membránok és mikrofluidikai alakzatok. A hivatkozott szerző kis porozitású felső- és a nagy porozitású alsó rétegből álló rendszer ultravákuumos majd magas hőmérsékletű hidrogénes hőkezelésével zárt membránokat alakított ki. A hőkezelés során a felületi energia minimumra való törekvés a nagy porozitású réteg „eltűnését”, s a kis porozitású réteg eltömődését eredményezheti, melyet in-situ epitaxiális Si rétegnövesztéssel tesznek teljessé. Mivel az üreg bezáródása kb. 1000°C-on történik, a lehűlés során kialakuló nyomáskülönbség nagy mechanikai deformációt eredményez, ami pl. egy mikro nyomásmérőben jelentős nullponthibát okoz. Ennek a nemkívánatos jelenségnek a kiküszöbölésére alternatív technológiai megoldásokat próbáltunk ki. Sajnos egy olyan rendszer megépítésére, ami egyszerre alkalmas ultravákuum létrehozására, majd ugyanabban a térben 4-5 bar túlnyomás elviselésére 1000-1200°C-on, nem volt lehetőségünk, így az adott technikai feltételek mellett nem sikerült az egyik – akár szabadalomképes - elképzelésünket megvalósítanunk. Alternatív megoldásként kidolgoztunk egy olyan elektrokémiai marási módszert, amiben az alsó, nagy porozitású réteg kialakítása, majd utólagos hőkezelése helyett a Si elektrokémiai polírozásával a kis porozitású membrán alatt tetszőleges

vastagságú üreg alakítható ki. A pórusos Si membránt 630°C-on, kis nyomáson leválasztott 0,2-0,3µm vastag polikristályos Si réteggel zárjuk le, így lehűlés után a membránban kialakuló feszültség és a deformáció is kisebb. A kísérleti eredményeket Takács András diplomamunkájában részletezi.

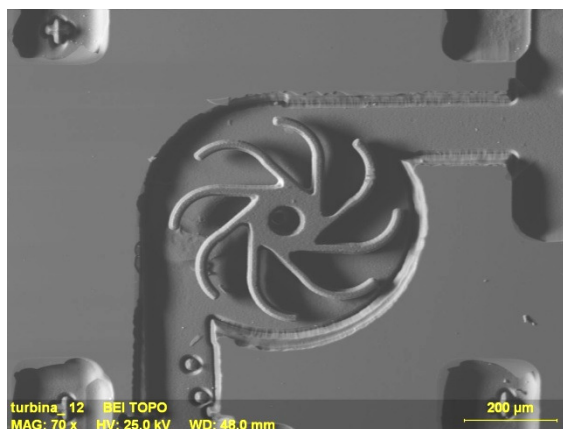


*Kétlépéses elektrokémiai marással készített eltemetett mikrocatornák. Az üreg elektropolírozással készült, a fedőréteg kis porozitású pórusos Si, amit vékony polikristályos Si réteg leválasztásával lehet zárttá tenni.*

#### • MEMS elemek protonnyaláb implantálás és pórusos Si marás kombinálásával

Dr. Rajta Istvánnal, az ATOMKI kutatójával együttműködve új eljárást dolgoztunk ki, melyben a protonnyaláb implantálás (PBW) és a pórusos Si mikromechanikai megmunkálás kombinációjával elsőként állítottunk elő, mozgó elemet tartalmazó mikrofluidikai eszközt. A 1,5µm félértékszélességű, max. 2MeV energiájú protonnyalábbal implantált Si egykristályban az implantálás okozta kristályhibák a Si lokális ellenállás-növekedéséhez vezetnek.  $\sim 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  dózis felett az implantált térrész ellenállása akkorára növekedik, hogy az adott térrészben nem folyik áram. Így az elektrokémiai pórusos Si marás itt nem játszódik le, azaz a protonnyalábbal besugárzott tetszőleges geometriájú alakzatok a pórusos Si marás után is egykristályosak maradnak. Mivel egy adott energiájú ion jól definiált mélységig hatol a Si kristályba, az elektrokémiai marási front mélységének beállításával tetszőlegesen előhívhatók az implantált térrész oldalfalai vagy túlmarással (az elektrokémiai marás izotróp) a teljes kristályos tömb is elválasztható a hordozótól. Kétenergiás, egymáshoz illesztett implantálással és megfelelően megválasztott pórusos Si marási mélységgel kialakítható egy olyan szerkezet, amelyben a kisebb energiával implantált Si-ból a marás végén szabadon mozgó MEMS elem lesz. Ezt a lehetőséget kihasználva kidolgoztunk egy olyan technológiai műveletsort, amelyben a mikroelektronikai, mikromechanikai és a PBW eljárás kombinációjával - ismereteink szerint a világon elsőként – állítottunk elő szabadon mozgó elemet tartalmazó MEMS szerkezetet. A demonstrációs eszköz egy mikroturbina, melyet az ICNMTA2008 konferencián mutattuk be, ahol a MEMS szekció meghívott előadója az elmúlt időszak kiemelkedő eredményeként hivatkozott a munkánkra. Mindezek ellenére még számos fejlesztési feladatot kell megoldanunk ahhoz, hogy ez a technológia teret nyerjen a gyakorlati alkalmazásokban: így a behatolási mélység környékén az ionfékezés és szóródás miatt kiszélesedő roncsolási terület minimalizálása, ill. olyan komplex technológia kidolgozása, amellyel a jelenség okozta probléma kiküszöbölhető. Úgy gondolom,

hogy ezt a munkát feltétlenül folytatnunk kell, mert jó eséllyel eljuttatható a gyakorlati alkalmazásig. Eredményeinket egy megjelent és egy, szakmai bírálatra benyújtott, 2009-ben megjelenő folyóiratcikkben ismertettük/jük.



*Protonnyaláb implantálással és pórusos Si mikromegmunkálással készített mikroturbina*

#### **Beruházások, költségek átcsoportosítása:**

A tervezett költségek egyes tételei között jelentős, a kutatási munka feltételeit javító átcsoportosításokat hajtottunk végre. A személyi kifizetések és konferencia részvételi díjak összes kiadása a tervezettnél közel 1500 eFt-tal kevesebb, amit a kísérletekhez és a technológiai sor működtetéséhez szükséges drága félvezető-technológiai anyagok és segédeszközök vásárlására fordítottunk.

#### **Az eredmények közzététele:**

A projekt eredményeit a jelentés beadásáig 6 folyóiratcikkben (kumulatív IF: 7,58) és 4 konferencia-kiadványban (abstract és extended abstract) jelentettük meg. A konferenciákon bemutatott eredményekből még 2 folyóiratcikk várható, amelyek 2009-ben jelennek meg. A fentiekén túl eredményeinket egy 1. helyezést nyert TDK dolgozatban, egy diplomaunkában és egy nemzetközi szabadalmi eljárás alatt álló szabadalomban ismertettük.

#### **Személyi feltételek változása:**

A végeselem modellezésben járatos kiváló fiatal kollégánk, *Vízváry Zsolt* a projekt első évében angliai ösztöndíjat kapott, és azóta is ott dolgozik egy nemzetközi magfúziós kutatási projektben, így a modellépítés korai szakaszában fel kellett hagynia ezzel a munkával.

*Volk János* több éves, nanotechnológiai tematikájú japán ösztöndíjat kapott, az ő helyére Pap Andrea lépett.

*Takács András* villamosmérnök hallgató személyében egy tehetséges és szorgalmas fiatalember csatlakozott a projekthez, aki 1. díjas TDK dolgozatot és jeles minősítésű diplomamunkát írt a pórusos Si kettősrétegből előállítható MEMS szerkezetekről. Sajnos egzisztenciális okokból a Ph.D. keretek közötti folytatás helyett a Bosch Magyarország munkatársa lett.

A projekt utolsó hónapjaiban önálló laboratóriumi gyakorlat keretében *Fekete Zoltán* negyedéves villamosmérnök hallgató vett részt a PBW-pórusos Si technika kidolgozásában. Remélhetőleg diplomamunkáját is a témából írja és egy év múlva az MFA doktorandusza lesz.

2007 októberétől a témavezető a BudaSolar Technológiai Kft. munkatársa, így a projekt utolsó szakaszában a befogadó intézmény (MFA) vendégkutatójaként vezette a kutatási munkát.

### **Összefoglalás:**

A tervezett feladatok túlnyomó többségét sikeresen teljesítettük. Úgy gondolom, hogy egy 4 éves kutatási program tervezésekor nem lehet teljes pontossággal meghatározni a várható eredményeket: az időközben felmerülő új ötletek, technikai lehetőségek az általános cél keretein belül hangsúlyeltolódásokat, ill. új kutatási irányokat jelölhetnek ki. Ez jellemző volt a jelen projektre is, így a módosított „smart-cut” technika kidolgozása és a mikromechanikai technológiával előállított prérészszámok előállítása helyett a sokkal ígéretesebb CMOS integrált pórusos Si mikromechanikai eljárás, ill. a protonnyaláb írás és a pórusos Si technológia új kombinációinak kidolgozását választottuk, amivel nemzetközi szinten is komoly szakmai sikereket értünk el. Hasonlóan jó eredménnyel zártuk a módosított lúgos marási technológia kifejlesztését is. Mindhárom területen sikerült alkalmazásig, ill. alkalmazás-közel demonstrációs eszköz előállításáig jutnunk.

Ugyanakkor nem hallgathatók el a nem, vagy csak részben teljesült célok, még akkor sem, ha ennek oka az időközben *megváltozott személyi feltételekben és korlátozott technológiai lehetőségeinkben* keresendő. Sajnos nem sikerült *végleges* formában kidolgoznunk azt a végeselem modellező programot, amely hasznos tervező eszköze lenne az 3D Si szerkezetek elektrokémiai úton történő előállításának, mert a témában járatos kollégánk a projekt 2. évétől külföldön, más szakmai területen dolgozik. Korlátozott technológiai/anyagi lehetőségeink miatt egy várhatóan sikeres membránkészítési technológia kidolgozásával csak félútig jutottunk, ezt a munkát a későbbiekben eredményes demonstrációig akarjuk elvinni.

Itt kell megjegyezni, hogy egy technológiai orientáltságú kutatási projekt nem illeszkedik a hazai, a K+F feladatokat alapkutatásra és gyakorlatilag prototípus előállítására fókuszáló kutatás-támogatási rendszerébe. Az OTKA, mint alapkutatást támogató intézmény elméleti és alapvetően meglévő berendezésekre alapozó kísérleti munkákat támogat, de az adott támogatási szinten a költséges (több tízmillió- néhány százmillió Ft-os) technológiai berendezések beszerzése lehetetlen. Ugyanakkor a NKTH/NFÜ nagy projektjei a rövid- és középtávon piacképes termékek, prototípusok kifejlesztését preferálja. A hazai felsőoktatási és akadémiai intézmények általánosságban siralmas technológiai apparátusa mindenképpen felújításra szorul – és ezt a fenti programok keretében nem, vagy csak a technológiai elmaradásunkat konzerváló szinten lehet megoldani. Ezért ezúton is javaslom az OTKA, az NKTH/NFÜ és az Akadémia döntéshozóinak *egy köztes, közép- és hosszabb távon jól definiált technológiai és alkalmazási célkitűzéseket is megfogalmazó, jelentős technológiai jellegű beruházásokat támogató* pályázati forma létrehozását. Ezzel áttételesen támogatnák az alap- és az alkalmazott kutatási projekteket is, és – mintegy legfontosabb hatásként – a pályakezdők számára a jelenleginél sokkal vonzóbb kutatási környezetet teremtenének.